

特別研究報告

題目

センサネットワークにおける時刻同期手法の
下位レイヤによる影響を考慮した比較評価

指導教員

村田 正幸 教授

報告者

牟田園 明

平成 19 年 2 月 20 日

大阪大学 基礎工学部 情報科学科

センサネットワークにおける時刻同期手法の下位レイヤによる影響を考慮した比較評価

牟田園 明

内容梗概

多数のセンサノードによって構成されるセンサネットワークにおいて、効率のよい情報収集や省電力化のためにセンサノード間の時刻同期は重要である。センサネットワークの適用範囲は様々であり、その適用箇所によってネットワークの規模や配置される環境は大きく異なると考えられる。そのため、それぞれのネットワークに適した時刻同期機構を用いる必要がある。特に、多数のセンサが広範囲に配置される大規模なセンサネットワークにおいては、ネットワーク全体に基準信号を送信することは困難であるため、自律分散型の時刻同期方式が有効であると考えられる。パルス結合振動子 (PCO) モデルは、蛍の発光や心臓のペースメーカー細胞など、生物界における個体間の局所的な相互作用により全体を同期させる仕組みをモデル化した、自律分散型の時刻同期方式である。一方で、同期の基準となるノードからの時刻のずれをマルチホップで伝達することで、ネットワーク全体の時刻同期を得るマルチホップ RBS 方式が存在する。本報告では、これら二つの方式に関して、MAC 層における遅延の揺らぎや、パケット損失の影響を考慮し、時刻同期に要する時間、時刻同期の精度、時刻同期に達する確率などの観点から比較を行った。シミュレーション結果を通じて、PCO は無線通信品質によらない安定度の高い時刻同期を広範囲の観測領域にわたって実現することができ、マルチホップ RBS は接続性の高い環境において短時間で正確な時刻同期が実現できることが明らかとなった。

主な用語

センサネットワーク、時刻同期、パルス結合振動子、CSMA/CA、マルチホップ RBS

目次

1	はじめに	5
2	対象とするシステム	8
2.1	ネットワークモデル	8
2.2	同期モデル	10
3	対象とする時刻同期方式	12
3.1	Pulse Coupled Oscillation (PCO)	12
3.1.1	パルス結合振動子による遅延を考慮した時刻同期機構	14
3.2	Reference Broadcast Synchronization (RBS)	16
3.2.1	マルチホップ RBS	18
3.2.2	マルチホップ RBS に適したクラスタリング手法	19
4	シミュレーションによる性能評価	21
4.1	シミュレーションモデルおよび評価尺度	21
4.2	PCO の同期性能	23
4.3	格子配置での比較	27
4.4	ランダムな配置での比較	32
4.4.1	ネットワークの規模による影響	32
4.4.2	センサの最大通信距離による影響	32
4.4.3	パケット損失による影響	35
4.4.4	同期ウィンドウのサイズによる影響	35
4.4.5	適用可能な観測領域の比較	40
4.5	PCO における CSMA/CA バックオフアルゴリズムの改良	40
5	おわりに	42
	謝辞	43
	参考文献	44

目次

1	CSMA/CA アルゴリズム	9
2	同期ウィンドウによるネットワーク同期の定義	11
3	PCO での発火による位相の変位	13
4	M&S モデルと Reachback Firefly Algorithm (RFA)	15
5	RBS アルゴリズム	16
6	アクセス遅延に対する RBS の時刻同期精度の依存性 [1]	17
7	マルチホップ RBS	18
8	マルチホップ RBS におけるクラスタ半径の制限	19
9	Lowest ID Clustering Algorithm によるクラスタリング	20
10	PCO による同期の成功例	24
11	PCO による同期の失敗例	25
12	ノード数に応じて状態変位幅 ϵ を変化させたときの性能	26
13	観測領域の半径の変化に対する時刻同期したノードの割合	27
14	同一配置での PCO とマルチホップ RBS	28
15	ノード間の距離が 20m の格子状ネットワークでの比較	28
16	ゲートウェイノードを含まないマルチホップ RBS	29
17	ノード間の距離が 15m の格子状ネットワークでの比較	30
18	ノード間の距離が 10m の格子状ネットワークでの比較	31
19	観測領域の半径を変化させたときの比較	33
20	センサの最大通信距離を変化させたときの比較	34
21	パケット損失率による影響 (PCO)	36
22	パケット損失率による影響 (マルチホップ RBS)	37
23	同期ウィンドウのサイズによる影響 (PCO)	38
24	同期ウィンドウのサイズによる影響 (マルチホップ RBS)	39
25	確実な同期を期待することができる観測領域の比較	41
26	CSMA/CA に変更を加えた PCO とマルチホップ RBS の、時刻同期にかかる時間の比較	41

表 目 次

1	シミュレーションにおけるパラメータ設定値	22
---	--------------------------------	----

1 はじめに

無線技術と半導体技術の発展により、近距離での通信能力を備えた低価格な小型センサの開発が可能となり、環境観測、医療計測、ホームセキュリティなどへの適用が期待されるセンサネットワーク技術が多くの研究者の注目を集めている [2]。センサネットワークでは、ネットワークを構成するセンサノードが、温度、湿度、動きなどの観測領域内の情報を観測し、シンクノードと呼ばれるデータ収集地点に収集された情報をエンドユーザが処理することによって、様々な目的が達成される。センサノードは小型の装置であるため通信能力、メモリ、バッテリー容量などが制限されているため、実用化に際しては以下のような問題を解決しなければならない。まず、個々のセンサノードが通信できる距離は限られているため、大規模なネットワークにおいてセンサノードは直接シンクノードと通信できない。したがってセンサノード同士が互いに中継するマルチホップ通信によってネットワークを構成する必要がある。また、センサノードは小容量のバッテリーしか搭載できず、一旦配置されたノードのバッテリーを交換することは困難であるため、センサネットワークにおいて電力消費の抑制は非常に重要である。消費電力を抑えるための一般的な手法として、センシングや情報転送に関わらない期間はセンサノードをスリープ状態にする方法がある [3]。また、センサノードがデータを送信するタイミングを調節することで、ネットワーク内に分布したセンサノードが受信した情報を効率的に収集することができる [4]。これらの省電力を目的とした動作制御は、センサノード間の時刻同期なくして行うことはできない。また、時刻情報を含むデータを収集する場合もあることから、センサネットワークにおいてセンサノード間の時刻同期は必要不可欠である。

ネットワークにおける時刻同期手法として良く知られているものとして、NTP (Network Time Protocol) [5] がある。NTP はノードの電力容量や通信能力、ネットワークの接続性が十分であることを前提としている。しかし、センサノードは通信できる距離が短く、NTP が前提とするほどの十分な通信能力を持ち合わせていない。また、センサネットワークにおいては、有線のネットワークと異なり、電力枯渇や故障によるセンサノードの停止や追加、さらには移動によってネットワークの形状は動的に変化する。これらのことから有線のネットワークを対象とした時刻同期機構は、センサネットワークには適用することが困難である [6]。また、センサネットワークが多数のセンサノードで構成されることを考えると、すべてのセンサノードに同期信号を送信したり、すべてのセンサの状態を把握したりするような集中型の制御は、拡張性がなく実現が難しい。そのため、大規模なセンサネットワークには、それぞれのセンサノードが周辺のノードとの間でのみ情報をやり取りするような、自律分散的な制御が適していると考えられる。

パルス結合振動子 (PCO: Pulse-Coupled Oscillator model) モデルは、蛍の発光や心臓の

ペースメーカー細胞など，生物界における個体間の局所的な相互作用によって，自律分散的に全体の同期を達成する仕組みをモデル化したものである [7]．パルス結合振動子モデルは，集中型の制御なく，近隣の振動子との局所的な相互作用のみによって大規模な時刻同期を達成する．自律分散型時刻同期機構では，このパルス結合振動子モデルをセンサネットワークに適用し，センサ端末間の相互作用によって同期を確立する．

一方で，自律分散型に対する集中型の制御として，RBS (Reference Broadcast Synchronization) [1, 8] がある．RBS は実時間ではなく，相対的な時間をやりとりすることで高い精度の時刻同期を達成する．まず RBS では，基準ノードが参照パケットを送信し，参照パケットを受信したノードは受信時刻を近隣ノードに知らせる．そして，他ノードの受信時刻の平均と，自らの受信時刻の誤差をもとに時刻同期を図る．既存の時刻同期機構では，MAC (Media Access Control) 層で発生する伝送遅延が，時刻同期の精度に大きな影響を与えるが，RBS では相対的な時刻を用いることでこの影響を受けずにすむ．RBS は集中型の機構であるため，ネットワークの規模の拡張性に欠ける．そこで，RBS を大規模なネットワークに適用できるように拡張したものがマルチホップ RBS である [1]．マルチホップ RBS では，まずクラスタリングを行い，各クラスタのクラスタヘッドを RBS の基準ノードとする．続いて，RBS によってそれぞれのクラスタ単位で同期し，基準となるクラスタの同期時刻をマルチホップで伝達することで，ネットワーク全体の時刻同期を図る．

本報告の目的は，自律分散型の時刻同期機構である PCO と集中型の制御であるマルチホップ RBS を比較し，それぞれの方式が適したネットワーク環境を明らかにすることである．これまでの研究では，PCO の基本的な特性や消費電力に関する性能評価はなされているが [9, 10]，他の時刻同期手法との比較は十分に行われていない．また，それらの研究は，理想的な条件下での評価にとどまっており，時刻同期の精度や時刻同期にかかる時間に大きな影響を与える遅延やパケット損失などの影響は明らかではない．無線回線で発生する干渉や雑音によるパケット損失，MAC 層に起因する遅延のゆらぎは，その上位層で動作する時刻同期手法の性能に大きな影響を与えられられる．そこで本報告では，PCO とマルチホップ RBS に関して，このような下位層の影響を考慮したうえで，時刻同期性能を比較する．性能評価指標としては，時刻同期に要する時間や時刻同期の精度，時刻同期状態に達するノードの割合などを採用する．MAC 層の通信プロトコルとして，センサネットワークでの標準プロトコルとして考えられている IEEE 802.15.4[11] などで用いられる CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) を採用する．そして，その上位層における時刻同期機構として PCO とマルチホップ RBS を実装したシミュレーション実験によって比較評価を行う．

本報告の内容は以下のようにになっている．まず，2 章で本報告で取り上げるネットワークモデルや同期の定義などについて説明する．次に 3 章で評価対象とする同期手法の仕組みと

その特長を述べ、4章では、ネットワーク環境が同期手法に与える影響を同期にかかる時間や同期精度の観点から評価し、その性能を明らかにする。最後に5章でまとめと今後の課題について述べる。

2 対象とするシステム

2.1 ネットワークモデル

センサノードは一定の通信能力を持ち、通信する相手や、距離に応じて通信範囲を変えることはできないものとする。また、全てのセンサノードは同じ機能を持つものとする。センサノードは内部時刻を刻む振動子を装備しており、振動子の周期は全て同じものとする。振動子の内部時刻 $C_i(t)$ を振動回数 $a_i(t)$ 、位相 $b_i(t)$ 、周期 T_i を用いて式 (1) に表す。本報告では全てのセンサノードの振動子の位相を合わせることを時刻同期と定義する。また、初期状態で各センサノードは時刻同期しておらず、位相はランダムに設定されるものとする。

$$C_i(t) = a_i(t)T_i + b_i(t) \quad (1)$$

センサノードの MAC 層プロトコルとしては、CSMA/CA を採用する。CSMA/CA では、パケットの送信を行う前にキャリアセンスを行い、回線が空いているかどうかを確認する。回線が使用中であった場合、一定時間以上回線が空いていることを確認してからパケットの送信を行う。このような制御を行っても、送信ノード同士が離れており互いの存在を確認できない場合、いわゆる「隠れ端末問題」によるパケットの衝突が発生する。それぞれの衝突したパケットは受信ノードにより棄却される。

本報告で用いる CSMA/CA は IEEE 802.15.4 [11] を参考にしたものである。各ノードは、変数 NB および BE を保持する。 NB は CSMA/CA アルゴリズムがバックオフを試行した回数で、この値はあらかじめ 0 に初期化される。 BE はバックオフ指数で、チャンネルの状態を評価するまでの待ち時間に関連し、この値はあらかじめ $MinBE$ に初期化される。図 1 に CSMA/CA アルゴリズムを示す。図 1 の各ステップではそれぞれ以下の処理を行う。

- (1) 各ノードは変数を初期化する。
- (2) 0 から $2^{BE} - 1$ の範囲のランダムなバックオフ期間だけ待って (3) に進む。
- (3) チャンネルが空き状態かどうかを調べ、アイドル状態であればチャンネルアクセスに成功したとしてフレーム送信を開始する。そうでなければ (4) に進む。
- (4) バックオフ指数とバックオフ試行回数を 1 だけ増やし、 NB がバックオフ最大試行回数 $MaxNB$ より大きければ、チャンネルアクセスに失敗したとして試行を終了する。そうでなければ、(2) へ戻り試行を繰り返す。

CSMA/CA で用いる 2.4GHz の周波数帯のシンボルレートは 62.5ksym/s であり、バックオフ単位時間は 20 シンボルであることからバックオフ基本時間は 320 マイクロ秒となる。

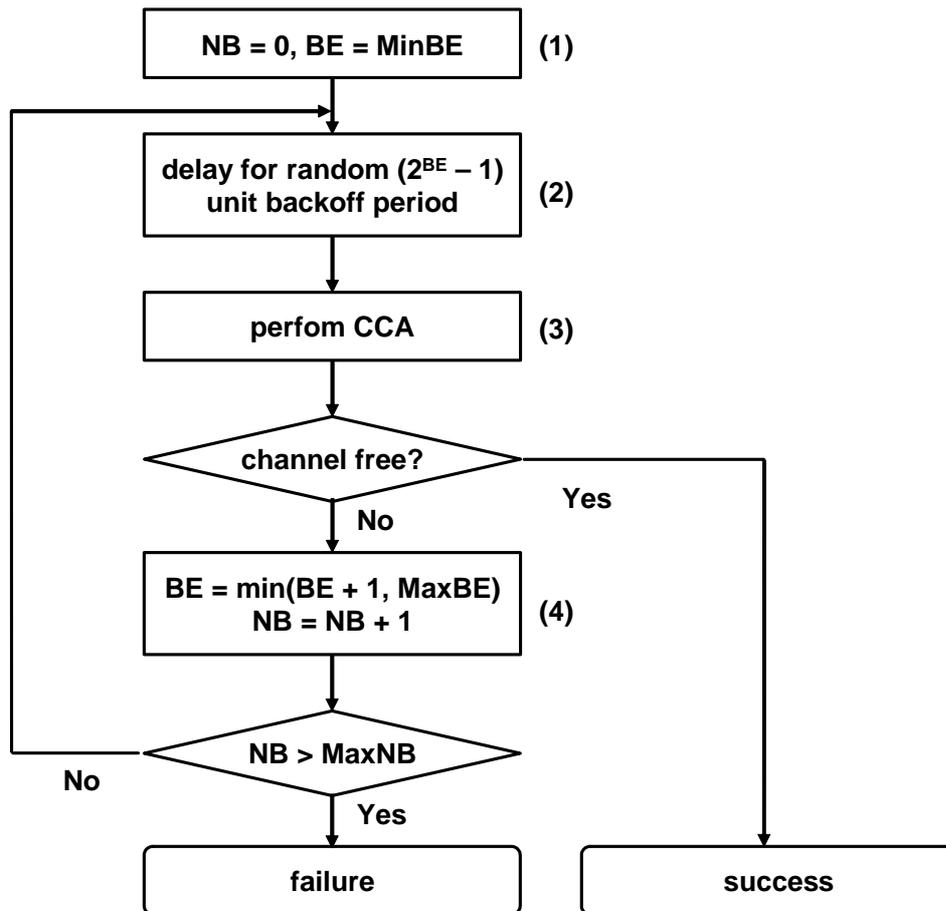


図 1: CSMA/CA アルゴリズム

この値よりも正確な同期は得られないため、本報告ではPCOの発火周期をバックオフ基本時間よりも十分に大きな10000シンボルとし、ミリ秒レベルの時刻同期を目標とする。

2.2 同期モデル

現実のネットワークでは、遅延や、干渉、パケットの損失によって全てのノードが完全に同期することは難しい。さらに、適用するアプリケーションによって、必要となる同期の精度も異なってくる。そこで本報告では、同期を判定するパラメータとして、また、目標とする同期精度の指標として同期ウィンドウ w を用いる [12]。位相が同期ウィンドウに含まれるノードの集合をグループとし、そのグループ内のノードは互いに同期しているものとみなす。同期ウィンドウは次のような性質をもつ。

- グループ内のノード数が最大となるように適用範囲を設定する
- どのノードも必ずいずれかのグループに含まれる

同期ウィンドウによるネットワーク同期の定義を図2に示す。白い丸はある時刻でのセンサノードの位相の値を表している。図2(a)のように全てのノードが1つのグループに含まれたとき、そのグループは完全同期状態であるとする。このとき、図2(b)のようなグループ分けを行ってはならない。また、図2(c)のように複数のグループが存在するとき、それぞれのグループはグループ内で部分同期状態にあるとする。

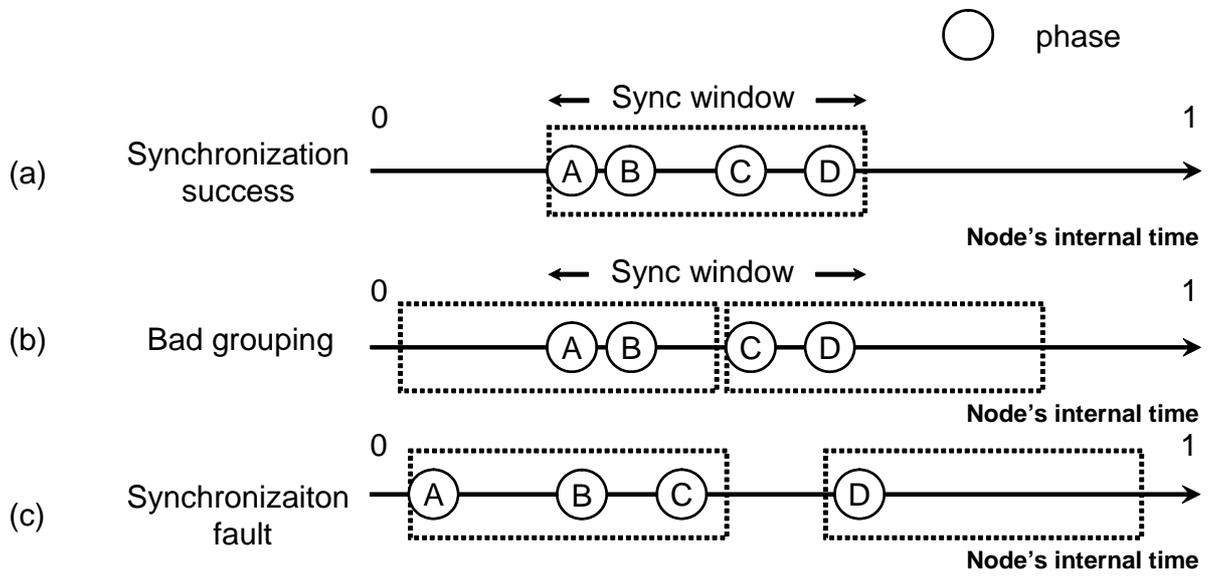


図 2: 同期ウィンドウによるネットワーク同期の定義

3 対象とする時刻同期方式

3.1 Pulse Coupled Oscillation (PCO)

文献 [7] では、パルス結合振動子モデルをセンサネットワークに適用した時刻同期機構である、M&S (Mirollo and Strogatz) モデルが示されている。振動子はそれぞれタイマによって定められた位相 $\phi \in [0, 1]$ と、位相によって定められる状態 $x \in [0, 1]$ に基づいて動作する (図 3)。

N 個の振動子の集合 $O = \{O_1, \dots, O_N\}$ について考える。振動子は時間の経過と共に変化する位相 ϕ_i 、状態 x_i をもち、 x_i は関数 f_i で与えられる。

$$x_i = f_i(\phi_i) \quad (2)$$

$f_i(0) = 0$ 、 $f_i(1) = 1$ であり、位相 ϕ_i は周期 T_i で 0 から 1 に遷移する。位相が 1 に達したとき振動子は発火し、位相は 0 に戻る。ただし、 $\frac{d\phi_i}{dt} = \frac{1}{T_i}$ である。時刻 τ_i に振動子 j が振動子 i の発火の刺激を受けたとき、 i と j は結合関係にあるといい、振動子 j の状態は ϵ だけ変化する。

$$x_j(\tau_i^+) = \begin{cases} x_j(\tau_i) + \epsilon, & \text{if } x_j(\tau_i) + \epsilon < 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

このような刺激を与えあうことにより、時間の経過とともに互いの振動子が同期するようになる。ただし、振動子は自身の発火の瞬間に受けた刺激を無視し、同時に複数の刺激を受けてもそれらを 1 つの刺激とみなすものとする。パルス結合振動子モデルでは、状態遷移関数 f_i や変位幅 ϵ を適切に設定することで、所望の向き、周期、形状の同期を達成することができる [13]。本報告では、全ての振動子が同じ位相に合わせる完全同期状態を目的としているため、 f_i として次式を用いる [7]。

$$\forall i, f_i(\phi_i) = \frac{1}{b} \ln[1 + (e^b - 1)\phi_i] \quad (4)$$

パラメータ b は、状態遷移関数の強度であり、 b の値が大きいほど早く同期することができる。このとき、関数 f_i の逆関数を g_i とする。

$$\forall i, g_i(x_i) = \phi_i = \frac{e^{bx_i} - 1}{e^b - 1} \quad (5)$$

発火の影響を受けた結果、ノードの位相が τ_i から τ_i^+ に変位したとき、その変位量 δ_i は次のように表すことができる。

$$\tau_i^+ = g_i(f_i(\tau_i) + \epsilon) \quad (6)$$

$$\delta_i = \tau_i^+ - \tau_i \quad (7)$$

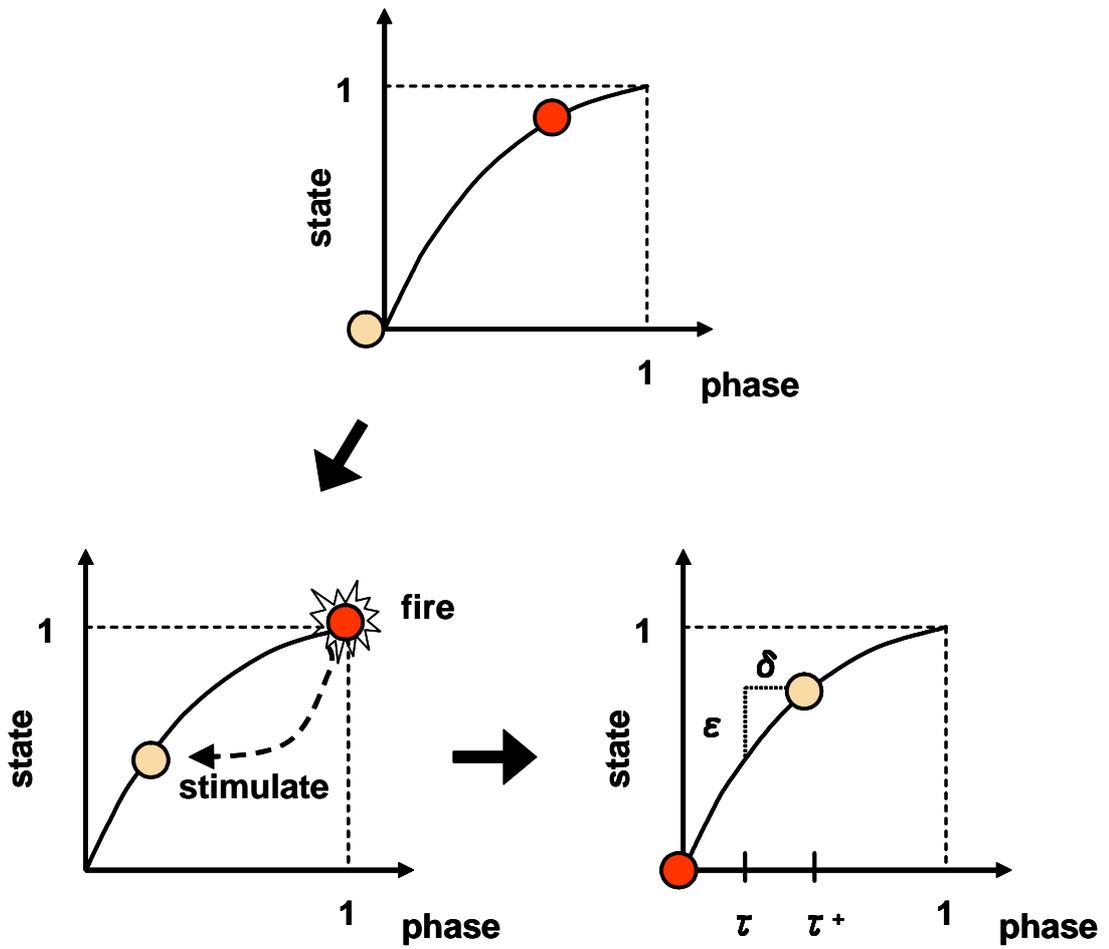


図 3: PCO での発火による位相の変位

3.1.1 パルス結合振動子による遅延を考慮した時刻同期機構

M&S モデルでは遅延を考慮しておらず、近隣のノードの発火の影響を瞬間的に受けることを前提としている。しかし実際には、ノードが発火してその情報を受信するまでに生じる遅延 δ を考慮して、同期しなければならない。つまり、発火の影響を受けた位相より δ 先立って自身が発火をするように、位相を変化させなければならない。そのためには、どれだけの遅延を経てパケットが届いたかを知る必要がある。

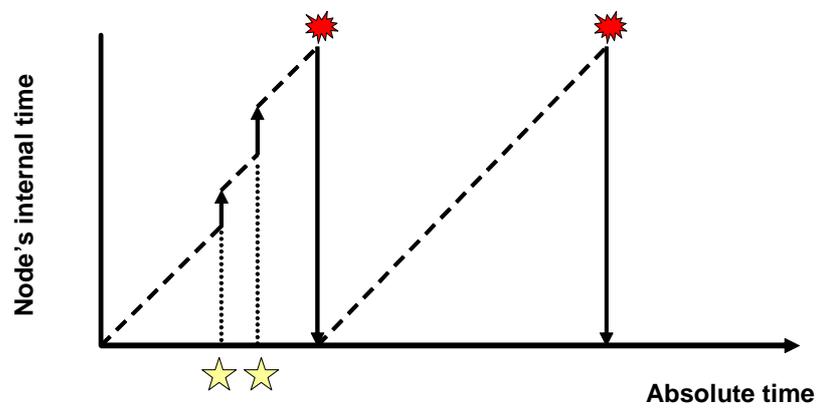
Reachback Firefly Algorithm (RFA) [12] では、MAC 層によるアクセス遅延を伝えるために、タイムスタンプが用いられている。まず、ノードが発火した時刻を記憶しておき、CSMA/CA により一定時間待った後に回線が空いていることを確認してからデータを送信する。このときに、待ち時間をタイムスタンプとしてデータに含ませることで、送信ノードが発火してからの遅延を受信ノードは知ることができる。

タイムスタンプによってアクセス遅延時間を知ることができるが、発火と同時に位相を変化させることはできないので、M&S モデルの必要条件を満たすことはできない。また、発火の影響を受けたと同時に位相を変化させた場合次のような不具合が生じる。ノード A が発火して、ノード B がその情報を受信するまでの間に発火した場合、ノード B はノード A の発火の影響を反映させることができない。また、時刻 $t_1, t_2 (t_1 < t_2)$ の 2 つの発火の影響を受けるとき、本来変化させるべき位相は $\delta(t_1) + \delta(t_2 + \delta(t_1))$ であるところを、 $\delta(t_1) + \delta(t_2)$ だけ変位させてしまう。これらのことを避けるために、RFA では発火を受けてもすぐに位相を変化させずにスタックに積んでおき、自身が発火してから一定時間 W 待った後に、スタックの値を呼び出して位相を変化させる。このときの待ち時間 W は、CSMA/CA のバックオフ時間よりも長くなければならない。発火する直前に他のノードから発せられた情報が遅延を経て届くまでの時間を考えて、発火してすぐには位相を変化させない。

RFA によって、MAC 層のアクセス遅延が PCO の精度に与える影響を取り除くことができる。しかし、同期にかかる時間はアクセス遅延によるところが大きい。1 回の通信にかかるバックオフ時間が長ければ、全体の動作時間も長くなる。発火の周期 T を小さくすることで、短時間に多くの相互作用をもたらすことができるが、 T はアクセス遅延よりも十分に大きくなければ RFA は成り立たない。同期するまでにノード間で多くのやり取りが必要なためにアクセス遅延が積み重なり、同期するまでに時間がかかることが PCO の問題点である。

- ★ Fire
- ☆ Fire effection

(a)
M&S model



(b)
RFA

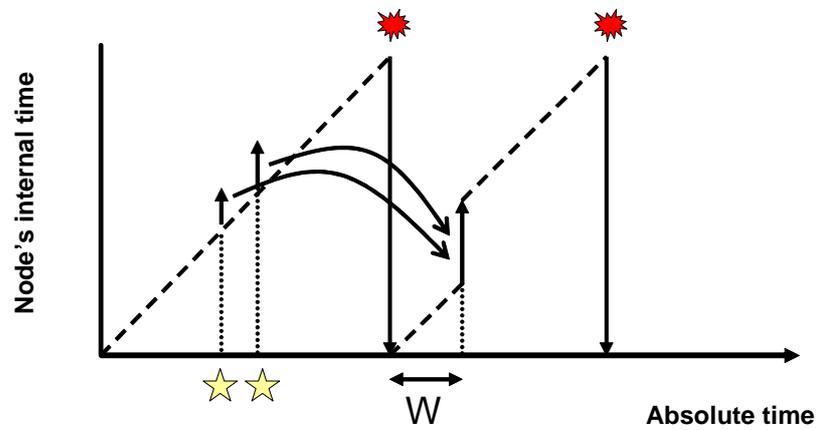


図 4: M&S モデルと Reachback Firefly Alogorithm (RFA)

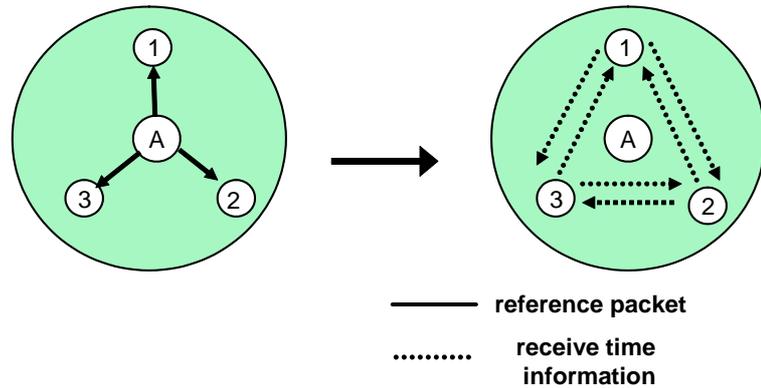


図 5: RBS アルゴリズム

3.2 Reference Broadcast Synchronization (RBS)

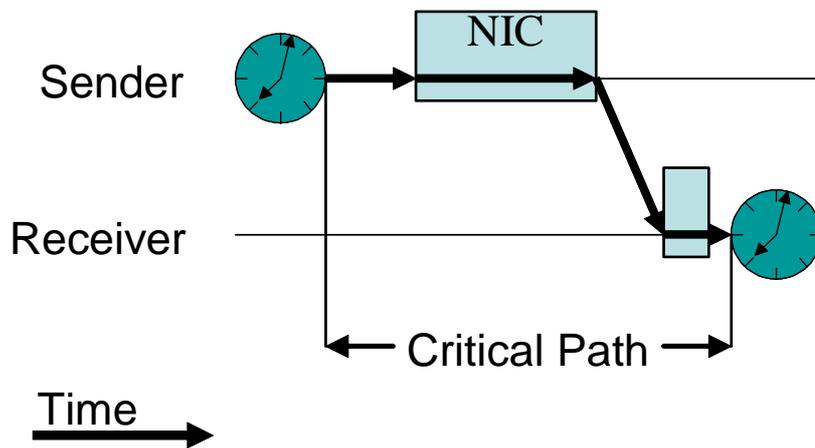
RBS [1] は、タイムスタンプを用いない時刻同期手法である。RBS の特長は、送信者と受信者の時刻を合わせるのではなく、受信者同士の時刻を合わせようとしている点にある。まず、基準ノードと呼ばれるあるノードからタイムスタンプを含まない参照パケットが送信される。参照パケットを受信したノードは、パケット到着時刻を参照時刻として周辺のノードとの時刻比較に用いる。RBS のアルゴリズムを以下に示す。

- (1) 基準ノードは参照パケットを送信する。
- (2) 参照パケットを受信した n 個のセンサノードはそれぞれ受信した時刻を記憶する。
- (3) センサノードは参照パケットを受信した他のセンサノードと受信時刻を交換する。
- (4) 交換した受信時刻と自らの受信時刻との誤差の平均時間 $\text{Offset}[i]$ を計算する。

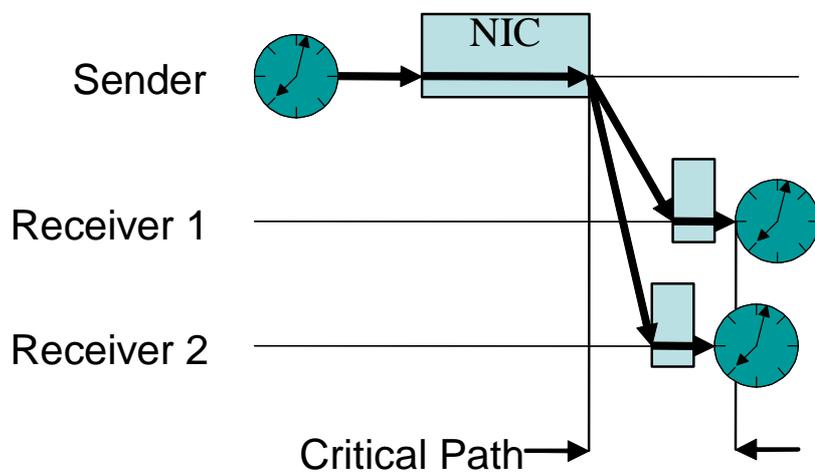
ただし、 n は参照パケットを受信するセンサノードの数であり、 T_r は参照パケットをセンサノード r が受信した時刻である。 $\text{Offset}[i]$ は式 (8) で与えられる。

$$\text{Offset}[i] = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (T_i - T_k) \quad \forall i \in n \quad (8)$$

RBS の最大の長所は、同期の精度がアクセス遅延の影響を受けない点にある。参照パケットを受信したノード間の参照時刻の誤差は、パケットが送信されて受信されるまでの誤差であるので、パケットが送信されるまでの経過時間であるアクセス遅延は無視することができる (図 6)。



(a) 既存の時刻同期手法で生じる遅延



(b) RBS で生じる遅延

図 6: アクセス遅延に対する RBS の時刻同期精度の依存性 [1]

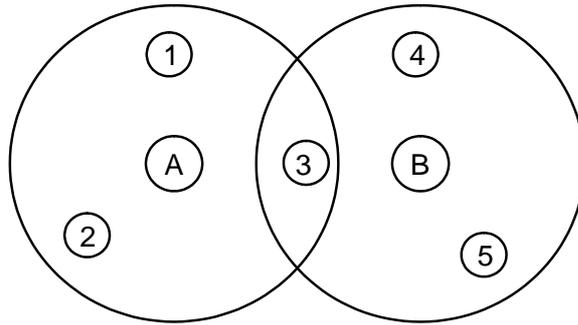


図 7: マルチホップ RBS

3.2.1 マルチホップ RBS

RBS が対応しているのは基準ノードの通信範囲内に全てのセンサノードが配置されている場合である。しかし、センサノードの最大通信距離よりも広範囲にわたるネットワークでは、単純に RBS を適用することができない。そこで、ネットワークを複数のクラスタに分割し、クラスタごとに RBS を適用してネットワーク全体の時刻同期を目指した手法がマルチホップ RBS である。マルチホップ RBS の基本的な動作を、図 7 に示す簡単なネットワークで説明する。ノード 3 のように、複数のクラスタに属するノードをゲートウェイノードと呼ぶ。ゲートウェイノード 3 はクラスタ A, B 両方のクラスタの時刻情報を知っているため、それら 2 つのクラスタの相対的な時刻を通訊するようなかたちで、他のノードに知らせることができる。マルチホップ RBS ではこのように、ゲートウェイノードを介してマルチホップに同期時刻をネットワーク全体に伝達していく。

マルチホップ RBS では 3 つのフェーズを経てネットワークを同期させる。

(1) クラスタリングフェーズ

全てのノードがいずれかのクラスタに属し、ゲートウェイノードによってクラスタが接続されたクラスタリングを行う。

(2) クラスタ内同期フェーズ

各クラスタ内で RBS を行う。

(3) クラスタ間同期フェーズ

ID が最小のノードが属するクラスタの同期時刻を、クラスタ間同期の基準時刻とし、ゲートウェイクラスタを介して基準時刻をネットワーク全体に知らせる。

マルチホップ RBS ではクラスタ内の両端のノードが直接通信して受信時刻を交換する必要があるために、クラスタの半径が制限される。ノードの最大通信距離を R としたとき、図

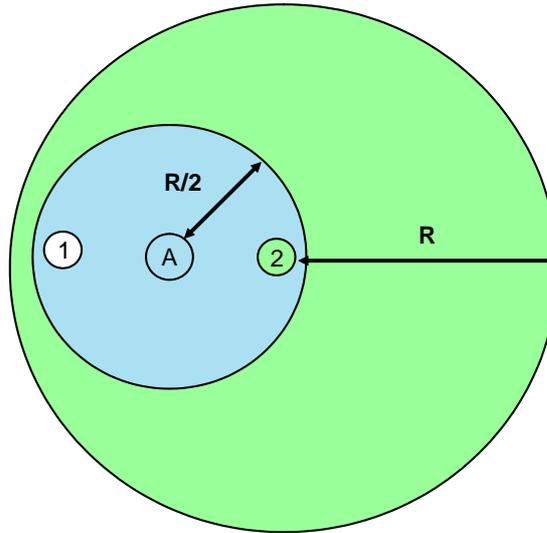


図 8: マルチホップ RBS におけるクラスタ半径の制限

8において、ノード1とノード2が通信するためには、クラスタ A の半径は $R/2$ となる。このとき、ノード2が通信した電波はノード2を中心とした半径 R 内のセンサノードに対して干渉を与えることになる。その結果、バックオフ時間が長くなり、干渉が起きた場合は同期の精度が低下してしまうという欠点を抱えている。

3.2.2 マルチホップ RBS に適したクラスタリング手法

マルチホップ RBS によってネットワーク全体の時刻同期を達成するためには、全てのクラスタがゲートウェイノードを介して連結していなければならない。また、クラスタ数が大きくなれば、クラスタ間での通信回数が多くなり、ネットワーク全体の同期にかかる時間が大きくなってしまふ。したがって、必要最小限のクラスタ数でクラスタリングが実現されることが望ましい。そこで本報告では、既存のクラスタリング手法のうち、マルチホップ RBS に適したクラスタリング手法として、LIDCA (Lowest ID Clustering Algorithm) [14] を用いる。LIDCA ではノードがネットワーク全体の情報を知ることなしに、簡単な方法でクラスタリングを行うことができる。まずクラスタリングに先立って、各ノードは自分の ID を周囲に知らせるために制御パケットをブロードキャストする。そして、自分の周辺のノード情報を手に入れてから、クラスタリングに移る。LIDCA のアルゴリズムを以下に示す。

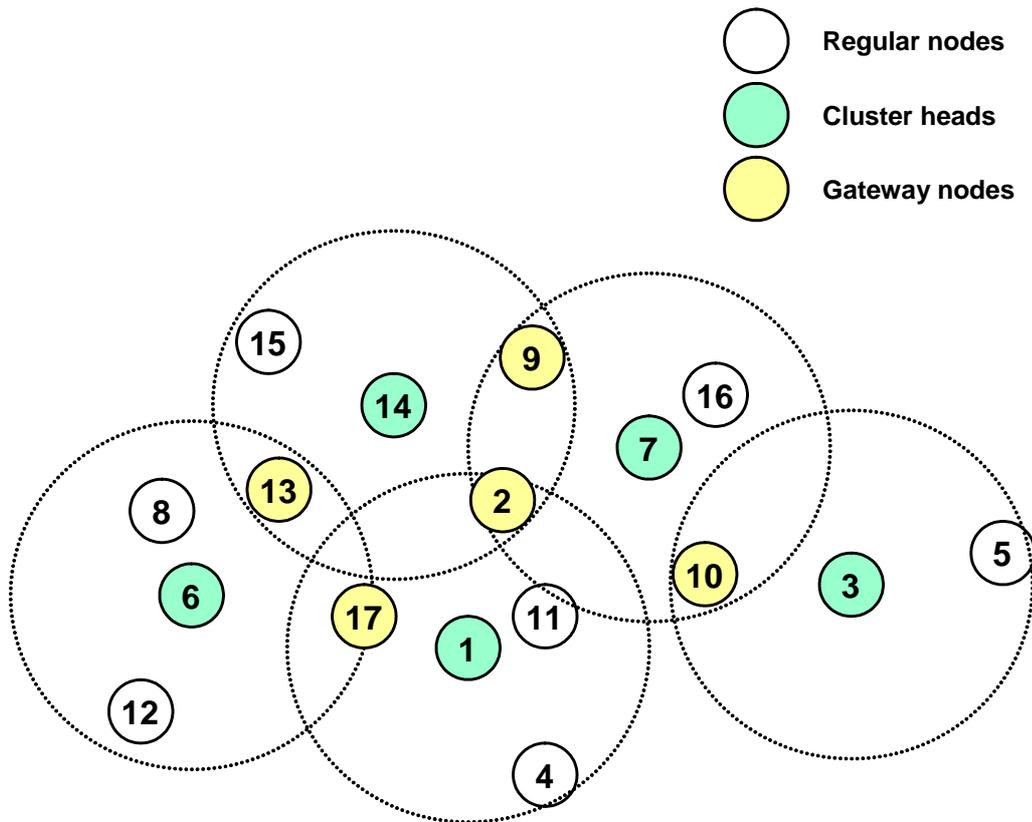


図 9: Lowest ID Clustering Algorithm によるクラスタリング

- (1) 周辺ノードの中で自分が一番 ID の小さいノードであればクラスタヘッドに立候補する .
- (2) 立候補を聞いたノードはそのクラスタに属することを周囲に伝える .
- (3) もし , 周辺ノードが全て他のクラスタに属した場合は , 自らがクラスタヘッドに立候補する .
- (4) 全てのノードがいずれかのクラスタに属するまで繰り返す .

4 シミュレーションによる性能評価

4.1 シミュレーションモデルおよび評価尺度

本報告では、PCO とマルチホップ RBS をそれぞれ CSMA/CA の上位層として動作するシミュレーションプログラムを作成し、性能比較を行う。観測領域は円形とし、その領域内にセンサノードを配置する。まず、PCO においては変位幅 ϵ が性能に大きな影響を与えるパラメータであると考えられるため、その値を決定するためにランダムな配置でシミュレーションを行う。また、PCO とマルチホップ RBS の比較においては、まず格子状の配置を用いて接続性のばらつきの影響を排除した比較をし、続いてランダムな配置における比較を行う。シミュレーションにおけるそれぞれのパラメータを表 1 のように設定し、特に断りがない場合はこの値を使用する。PCO の周期を 10000 シンボル (0.16 秒)、最大シミュレーション時間を 50 秒とする。

また、本報告では次の 4 つの観点から時刻同期の性能を比較する。

- 時刻同期するノードの割合

同期ウィンドウによって同期を判定した結果、最大グループのノード数を全ノード数で割った値を、ネットワーク内で時刻同期するノードの割合とする。

- ネットワーク全体が時刻同期する確率

本報告では、1 試行あたり 200 回のシミュレーションを行っている。完全同期状態に達した回数を試行回数で割ったものを、ネットワーク全体が時刻同期する確率とする。

- 時刻同期の精度

ノードの位相の分散を時刻同期の精度とする。分散の値が小さいほど、正確な時刻同期ができたとみなす。しかし、ノードの位相は周期関数であるため注意が必要となる。すなわち、位相 0.1 と位相 0.9 の差は 0.8 ではなく、0.2 である。本報告では、同期ウィンドウに含まれるノード数が最大のグループの位相平均を分散の基準値とする。ノード数を n 、位相を x_i 、最大グループの位相平均を \bar{x} 、位相平均との位相誤差を e_i としたとき、分散 v は次の式によって与えられる。

$$v = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (9)$$

$$e_i = \begin{cases} \bar{x} - x_i, & |\bar{x} - x_i| < 0.5 \\ 1 - |\bar{x} - x_i|, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

- 時刻同期するまでの時間

マルチホップ RBS では全てのクラスタにクラスタ間同期時刻が行き渡るまで、PCO

では同期条件である 5 周期連続して完全同期を満たすまでの時間を同期するまでの時間とする。マルチホップ RBS と PCO いずれにおいても、同期条件を満たさなかったときはこの時間に含まれない。

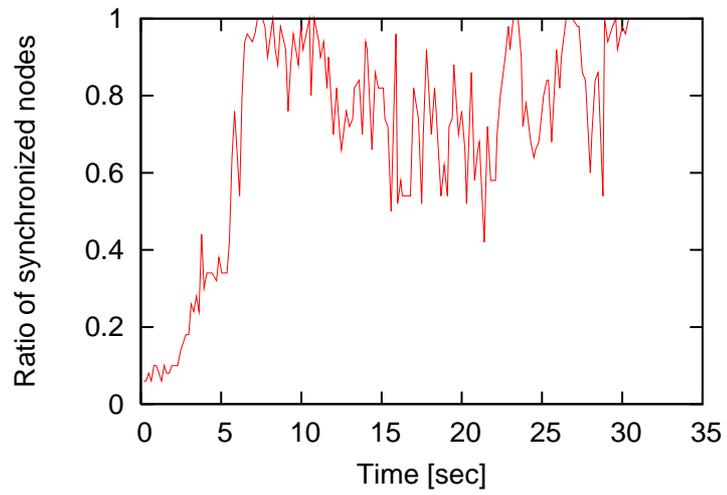
表 1: シミュレーションにおけるパラメータ設定値

パラメータ	デフォルト値
ノード数	50
観測領域半径	100 m
センサノードの通信距離	50 m
パケット消失率	0.001
同期ウィンドウサイズ	0.1
位相変位幅 ϵ (PCO)	0.0015
状態遷移関数の強度 b (PCO)	5
発火周期 T (PCO)	0.16 sec
最大シミュレーション時間 (PCO)	50 sec

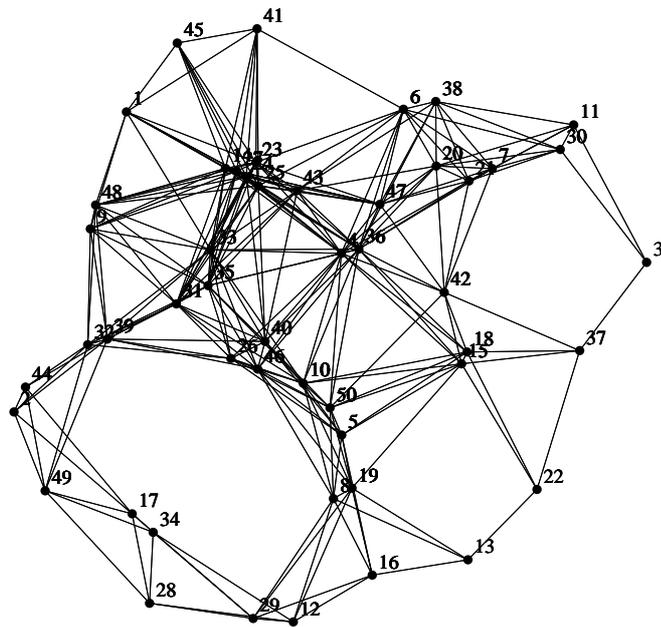
4.2 PCOの同期性能

PCOはセンサノードが相互に刺激を与え合い、時間と共に徐々に同期状態に近づいていく。その様子を、時刻同期するノードの割合を指標にして図10に示す。一度は完全同期状態に達したとしても、不安定であるために状態が崩れる場合もあることがわかる。その後安定した接続状態を作るまでに何度も繰り返し試行を繰り返した結果、最終的に安定した同期をとることができる。1つのノードの通信範囲は限られているため、発火の情報がネットワーク全体に行き渡るまでにはある程度の時間を必要とする。また、同期の過程で偶然に全てのノードが1つのグループに含まれ、偶然の同期が起こることがある。センサノードはネットワーク全体の情報は持ちえておらず、あくまでも自身の周辺の状況を見て、ネットワークが同期したかどうかを判断しなければならない。そのため、自身が周辺のノードと確実に同期していることを確認しなければならない。本報告では、安定した同期状態を確認するために、5回連続して全てのノードが1つのグループに含まれたとき同期したこととする。

同期ウィンドウのサイズが大きければ、短時間、高確率で同期することができる。同期ウィンドウが小さければ、ノード全てがウィンドウ内に収まることは困難なので、同期するまでに時間がかかり、最悪同期できない場合もある。同期に失敗する場合を図11に示す。単発的に同期状態になることはあるが、その状態を保持することができないために試行を繰り返している。図10, 11では共にウィンドウサイズを $w = 0.01$ に設定しているが、同期できない理由としてネットワークのトポロジ形状が考えられる。特定のノードに接続が集中する場合は同期できないことがある。さらに、同期に影響を与える制御パラメータとして、発火の影響を受けた際の変位幅 ϵ がある。 ϵ を適切に設定しなければ、PCOは同期を達成することができない。図12に、ノード数に応じて ϵ の値を変化させたときの様子を示す。 ϵ が小さければ同期する確率は高くなるが、同期にかかる時間は長くなる。また、 ϵ が大きければ早く同期に達することができるが、大きすぎる値を与えた場合、同期する確率は著しく低下してしまう。すなわち、 ϵ には同期に到達する確率と時間の観点から最適な値が存在すると考えられる。 ϵ の最適値を決定する要因は、あるノードと連結しているノード数であるが、これにはネットワークの全ノード数だけではなく、観測領域の広さも影響を与えることが図13から分かる。さらに、ノードの配置が一樣ではない場合には、連結しているノード数のばらつきやネットワークのトポロジの影響も考慮する必要がある。このように ϵ の最適値を求めることは単純ではないので、今後の課題とする。以後本報告では、対象とするネットワークの規模を考慮して、 $\epsilon = 0.0015$ と設定する。

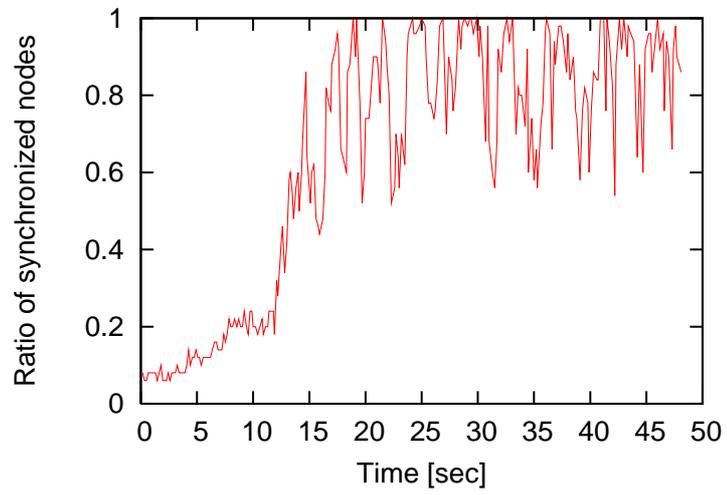


(a) 同期グループの最大値の変化

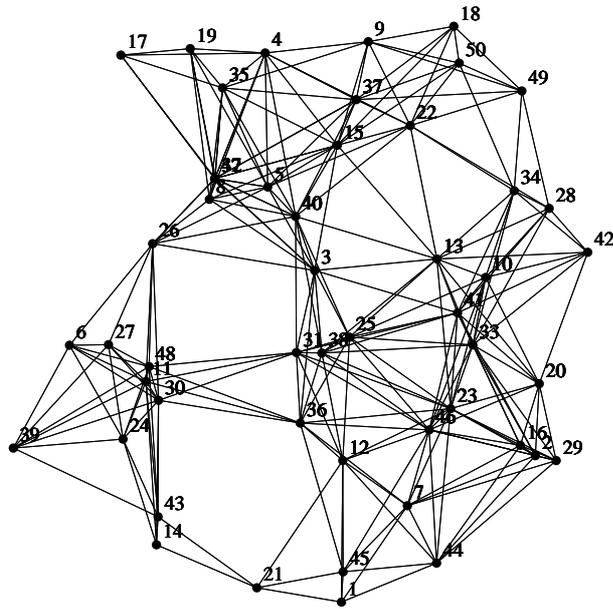


(b) トポロジ

図 10: PCO による同期の成功例

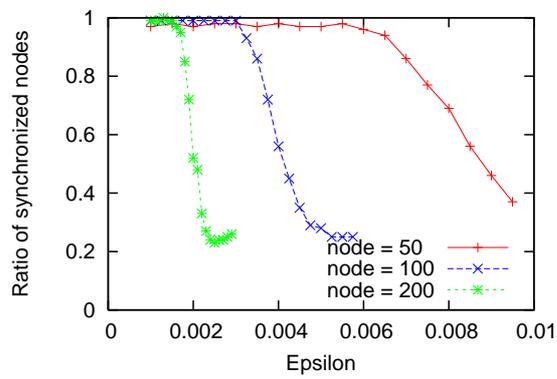


(a) 同期グループの最大値の変化

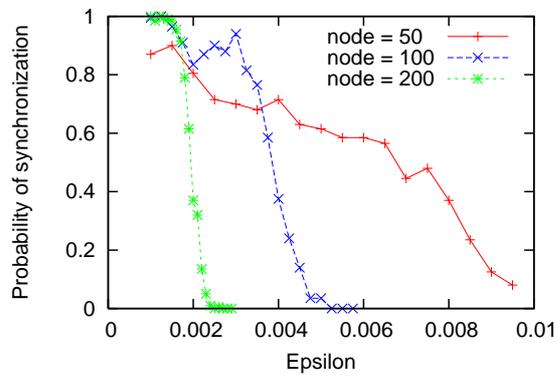


(b) ノード 12 と 16 で同期が達成されない

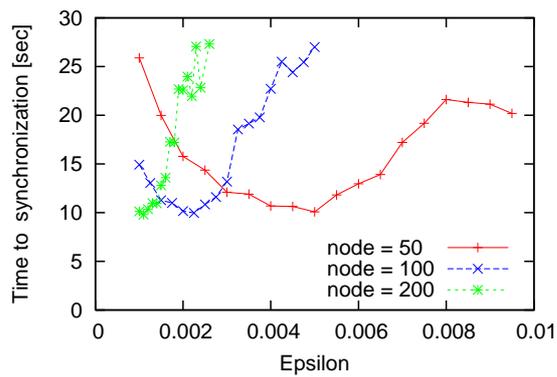
図 11: PCO による同期の失敗例



(a) 時刻同期するノードの割合



(b) ネットワーク全体が時刻同期する確率



(c) 時刻同期するまでの時間

図 12: ノード数に応じて状態変位幅 ϵ を変化させたときの性能

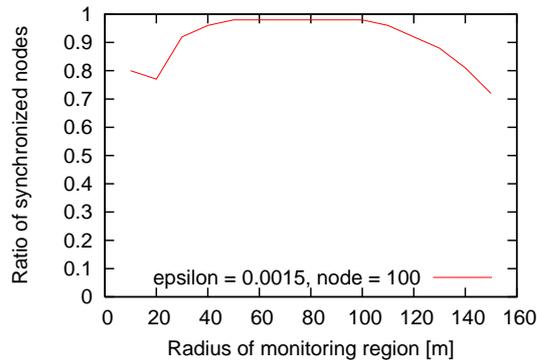


図 13: 観測領域の半径の変化に対する時刻同期したノードの割合

4.3 格子配置での比較

まず，格子状にセンサノードを配置してPCOとマルチホップRBSを比較する．各センサノードは互いに等間隔に配置される．このような配置では，確実な接続性を保つことができ，全てのノードは均等に扱われるため，それぞれの手法の基本的な性質を知ることができる．同一の格子配置にPCOとマルチホップRBSを適用したときの様子を図14に示す．3.2.1で述べたように，マルチホップRBSのクラスタ半径は最大通信距離の半分に制限されるため，マルチホップRBSの1つのクラスタがカバーする領域は，本来センサノードが持っている通信能力でカバーできる領域よりも小さくなる．一方でPCOは，他者からの制限を受けることなく，センサノードが通信できる最大限の通信範囲によって接続性を確立できる．このことは，両者の比較において重要な意味をもつ．

図15は，ノード間の距離を20mに固定したままノード数と観測領域を少しずつ増やしていった場合の比較である．PCOはどのような状況においても常に全てのノードが同期できているが，マルチホップRBSは約半数のノードしか同期できず(図15(a))，ノード数が50個を越えてしまうと完全同期状態に達することはなくなっている(図15(b))．そのため時刻同期の精度は遥かにPCOよりも劣っている(図15(d))．これは，図16のようなクラスタリングが原因だと考えられる．クラスタヘッドがわずかのノードとしか接続していないとき，このようなゲートウェイノードを含まないクラスタが生まれる．ゲートウェイノードを含まないクラスタはクラスタ内で同期することはできても，クラスタ同期時刻を受け取ることができないので全体との同期をとることができない．このように，クラスタリングが失敗するとマルチホップRBSは同期することができない．すなわち，マルチホップRBSによって確実な同期を実現するには，ノード間の距離を密にする必要がある．

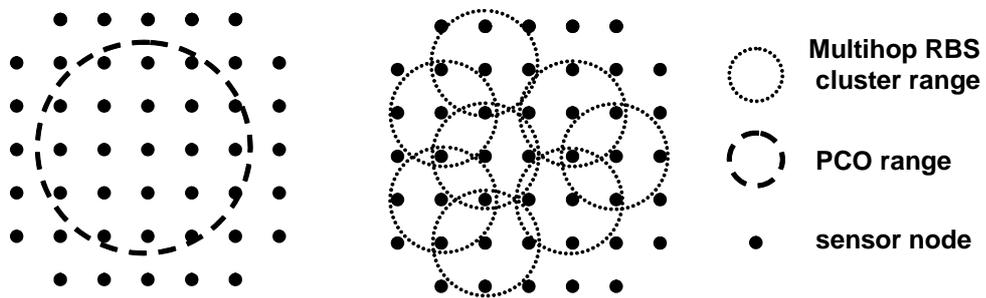
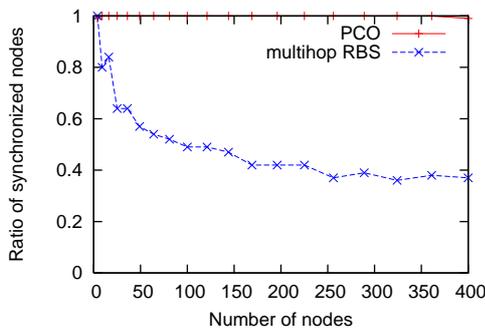
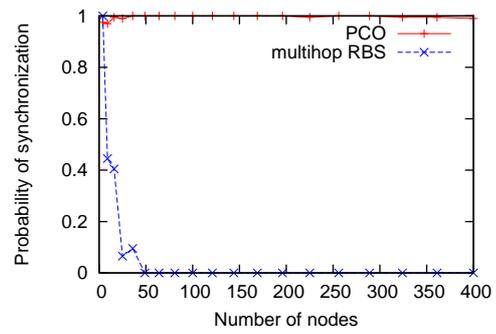


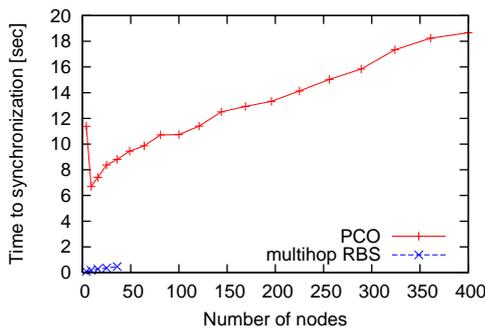
図 14: 同一配置での PCO とマルチホップ RBS



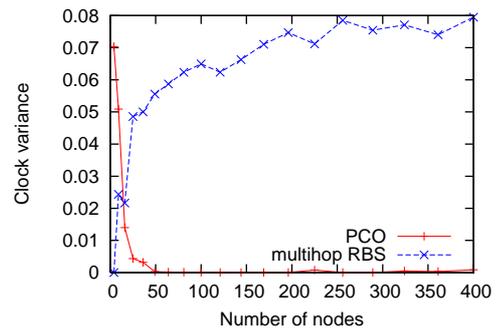
(a) 時刻同期するノードの割合



(b) ネットワーク全体が時刻同期する確率



(c) 時刻同期するまでの時間



(d) 時刻同期の精度

図 15: ノード間の距離が 20m の格子状ネットワークでの比較

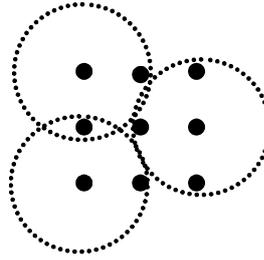
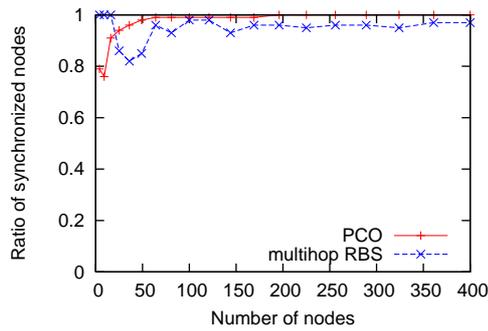
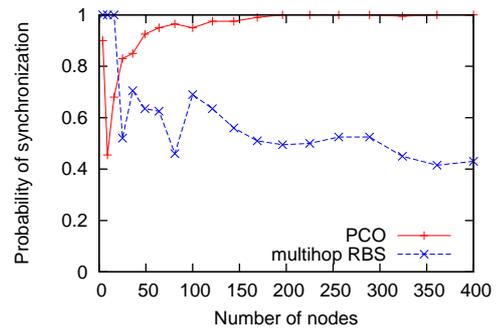


図 16: ゲートウェイノードを含まないマルチホップ RBS

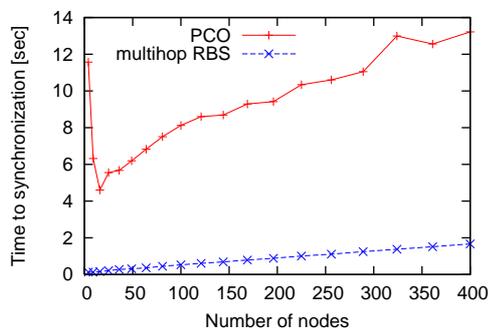
図 17 は、ノード間の距離を 15 m に固定したままノード数と観測領域を少しずつ増やしていった場合の比較である。ノード間の距離が縮まり接続性が増したことでゲートウェイノードが増え、図 15(a) に比べてマルチホップ RBS の同期するノードの割合が高くなっている (図 17(a))。完全に同期できない原因として、クラスタリング以外にパケット損失の影響も考えられる。マルチホップ RBS によって完全に同期するにはより密な接続性が必要である (図 17(b))。さらに、時刻同期の精度も依然 PCO よりも劣っている (図 17(d))。マルチホップ RBS は干渉が起きないように余裕を持ったデータ送信スケジュールを立てているが、「隠れ端末問題」により偶発的に干渉が起こってしまうことがあり、その影響が同期の精度に現れていると思われる。PCO は同期状態において多くのノードが集中して通信を行うことで、CSMA/CA によるアクセス遅延が増大するため、マルチホップ RBS よりも遥かに時刻同期に時間がかかる (図 17(c))。



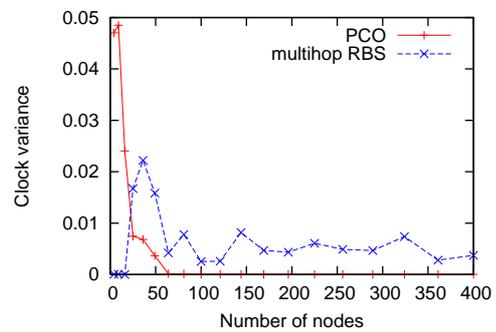
(a) 時刻同期するノードの割合



(b) ネットワーク全体が時刻同期する確率

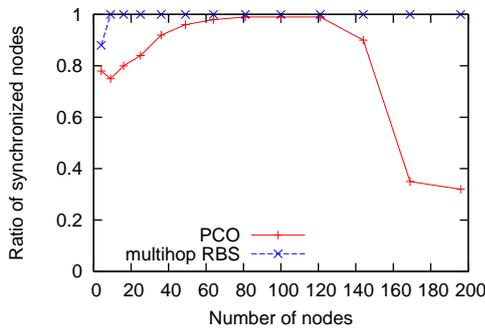


(c) 時刻同期するまでの時間

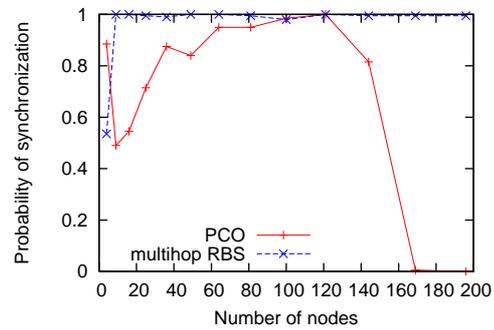


(d) 時刻同期の精度

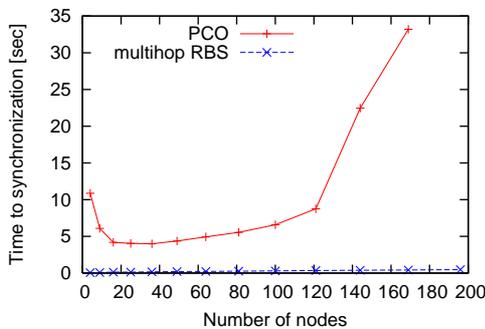
図 17: ノード間の距離が 15m の格子状ネットワークでの比較



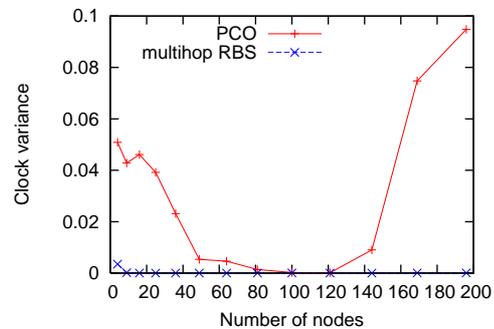
(a) 時刻同期するノードの割合



(b) ネットワーク全体が時刻同期する確率



(c) 時刻同期するまでの時間



(d) 時刻同期の精度

図 18: ノード間の距離が 10m の格子状ネットワークでの比較

図 18 は、ノード間の距離を 10 m に固定したままノード数と観測領域を少しずつ増やしていった場合の比較である。マルチホップ RBS は完全に同期することができている (図 18(a))。コネクティビティがさらに増したことで、ゲートウェイノードが確実にクラスタ内に存在し、クラスタあたりのノード数が増えたことでパケットロスによる誤差を、クラスタ内ノードの平均値で補っているからである。逆に PCO は接続するノード数が過剰に多くなり、観測領域も広がったことで ϵ が許容範囲からはずれるため同期できない (図 18(b))。同じ理由で PCO は時刻同期にかかる時間も長くなり、時刻同期の精度も落ちる (図 18(c), 18(d))。

以上の結果から、マルチホップ RBS は配置されるノード間の距離が狭まり、接続性が高くなればなるほど早く正確に同期できることが明らかになった。一方で PCO は接続性が高くなりすぎると、同期に失敗しやすくなる。PCO とマルチホップ RBS が適したノード間の距離、ネットワークのノード密度は異なっている。このような関係を踏まえ、ネットワーク環境が PCO とマルチホップ RBS に与える影響を、ランダムな配置でも確かめる。

4.4 ランダムな配置での比較

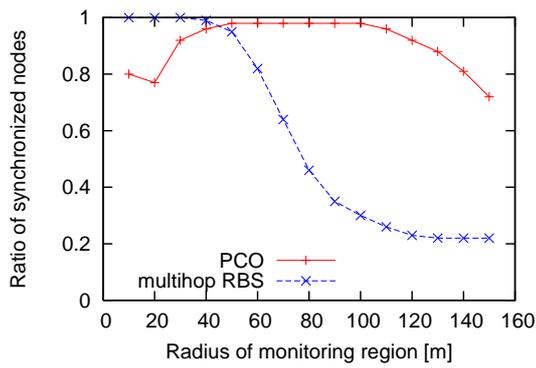
本節ではセンサノードを円形状の観測領域内にランダムに配置する．格子状の配置とは異なり，ネットワーク全体の接続性のないトポロジが生成されうる．そのような環境で，PCO とマルチホップ RBS がどのような振る舞いをするかを明らかにする．

4.4.1 ネットワークの規模による影響

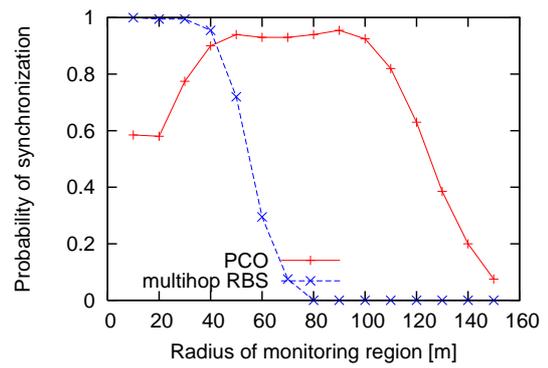
図 19 は観測領域の半径を変化させたときの比較である．観測領域の半径が大きくなるほど，ノード密度は薄くなり接続性は低くなる．ノードが密集した環境では PCO は同期できないが，マルチホップ RBS は同期することができる (図 19(b))．観測領域が広がるにつれ PCO は適度なノード接続数に至り，ほとんど全てのノードが同期ウィンドウに収まるようになる．逆にマルチホップ RBS は，ゲートウェイノードを持たないクラスタが増えることで，同期確率は低下する．PCO が対応できる観測領域の広さにも限界があり，さらに観測領域が広がると PCO も徐々に同期確率は低下していく．9 割以上のノードが同期することのできる観測領域の半径を比較したとき，PCO は 40 m から 110 m であるのに対して，マルチホップ RBS は 60 m までであることから，PCO のほうが適用可能な観測領域が広いことがわかる (図 19(a))．

4.4.2 センサの最大通信距離による影響

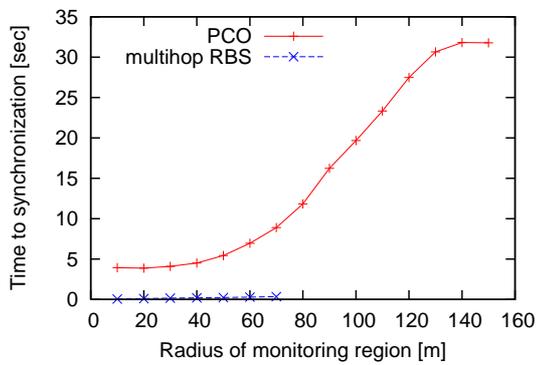
図 20 はセンサの通信距離を変化させたときの比較であり，図 19 と同様に接続性による性能の変化について述べる．PCO はマルチホップ RBS に比べて，小さな通信能力しか持たないセンサノードでも同期できることが図 20(a) から分かる．通信距離が増加したときに PCO の同期確率は下がっているが，これは 4.2 節でも述べたように，状態変位幅 ϵ の設定が不適切だからである．コネクティビティが強くなりすぎると PCO では，他ノードからの刺激を過剰に受けるため，位相が収束しない．このような状況を避けるためには， ϵ の値をより小さく設定しなければならない．マルチホップ RBS は通信距離の増加と共に同期確率が高くなり，同期にかかる時間も短くなっている (図 20(c))．ここで，マルチホップ RBS が十分に性能を発揮することができる環境に注目する．図 20(b) より，通信距離が 120 m のとき同期確率は 0.92 である．このとき表 1 より，半径 100 m の観測領域内に 50 個のセンサノードを配置していることになる．このように，十分な接続性のある環境でマルチホップ RBS は非常に高い精度で同期できるが，そのためには非常に多くのノードが必要となる．



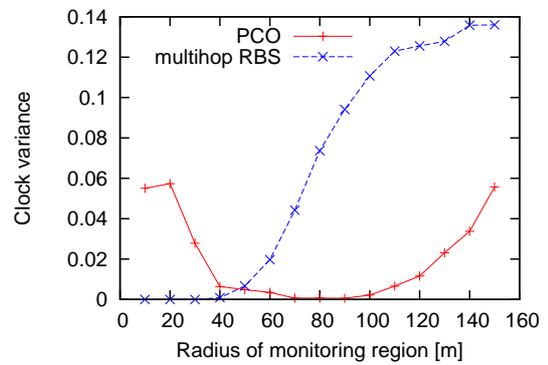
(a) 時刻同期するノードの割合



(b) ネットワーク全体が時刻同期する確率

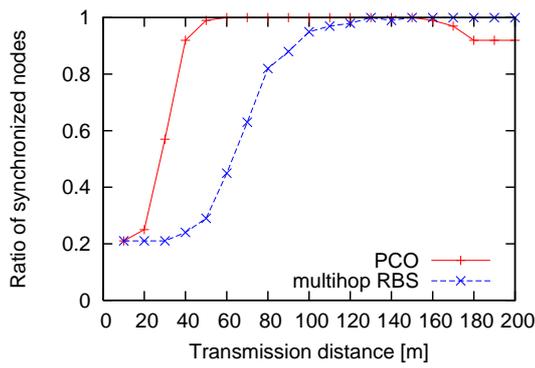


(c) 時刻同期するまでの時間

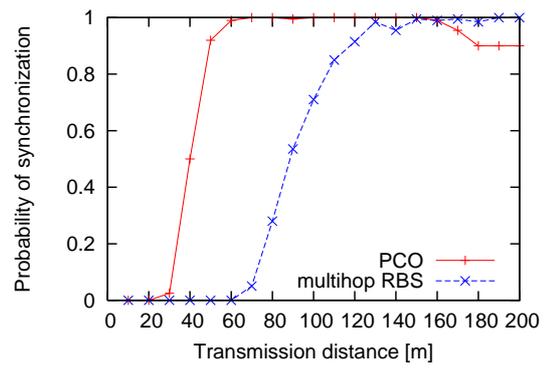


(d) 時刻同期の精度

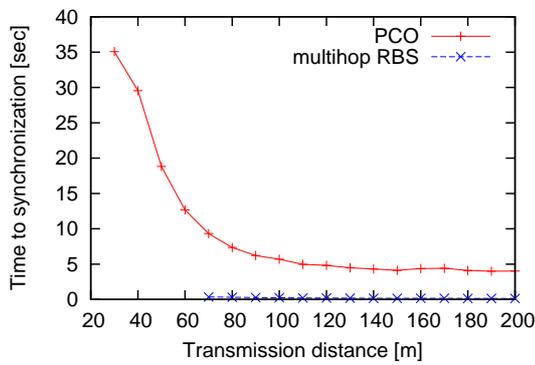
図 19: 観測領域の半径を変化させたときの比較



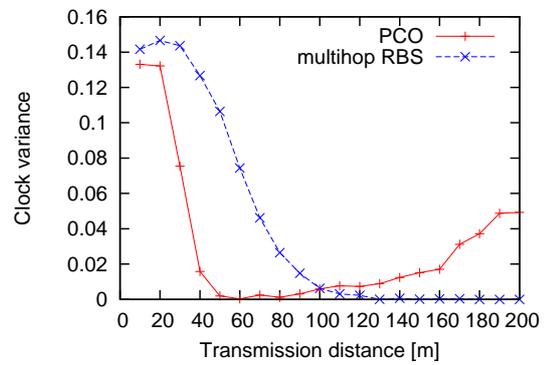
(a) 時刻同期するノードの割合



(b) ネットワーク全体が時刻同期する確率



(c) 時刻同期するまでの時間



(d) 時刻同期の精度

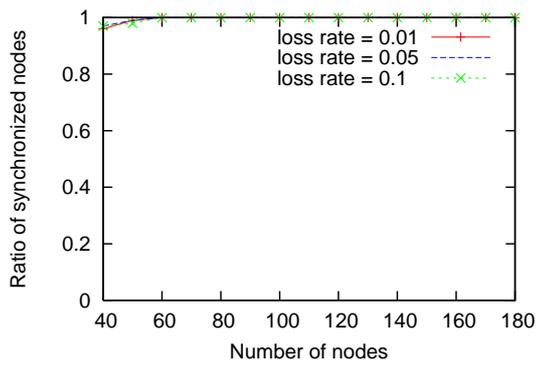
図 20: センサの最大通信距離を変化させたときの比較

4.4.3 パケット損失による影響

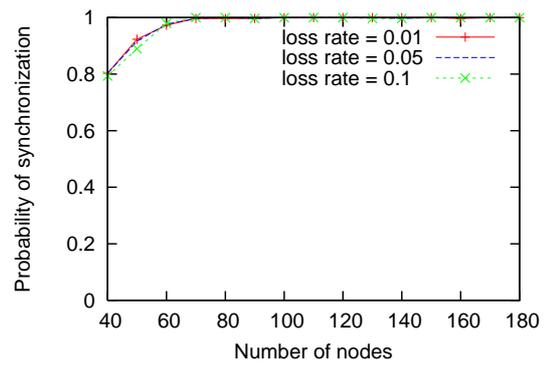
図 21 はセンサのパケット損失の発生確率を変化させたときの PCO の評価である。パケット損失確率が大きくなっても、PCO の性能はほとんど変化しない。PCO は繰り返しパケットを相互に送り合い、徐々に同期に近づく手法なので、1 回のパケット損失が同期に及ぼす影響は少ない。また、近隣のノードがほぼ同時に発火することで同期状態におけるパケットの損失を補うことができる。それに対して、マルチホップ RBS はパケット損失の増加に伴って著しく性能を低下させる (図 22)。パケットの損失は無線伝播におけるフェージングやノイズなどによって発生するが、PCO はそのような不安定な通信環境でも同期を実現できる。一方で、マルチホップ RBS はパケット損失の影響を受けやすい。したがって、パケット損失の多い環境で RBS を利用するためには、再送によらずにパケット損失率を抑える FEC (Forward Error Correction) などの手法が必要になると考えられる。

4.4.4 同期ウィンドウのサイズによる影響

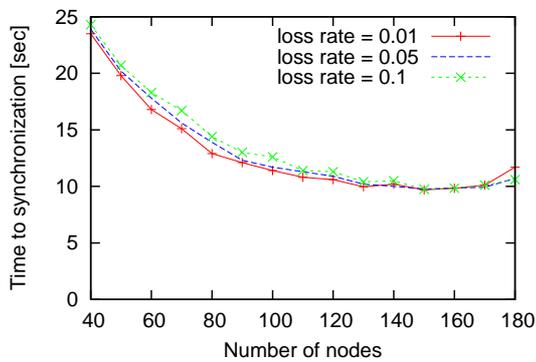
図 23 は目標とする同期の精度を変化させたときの PCO の評価である。PCO は同期ウィンドウのサイズを小さくしても、時刻同期にかかる時間や、時刻同期するノードの割合が変化しない。つまり、PCO が同期できるときは非常に密集して同期ウィンドウ内に収まるが、そうでないときはいつまでも同期に達することができないということがいえる。一方でマルチホップ RBS は、同期ウィンドウのサイズは試行の終了判定には関与しないので、時刻同期にかかる時間や、時刻同期の精度は変化しない (図 24(c), 24(d))。同期ウィンドウのサイズが小さくなったとき、同期するノードの割合の低下は僅かである (図 24(a)) のに対して、ネットワーク全体が同期する割合は大きく低下している。これはパケット損失によるものである。パケット損失が起こったとき、その影響を受けたノードとネットワークの同期時刻には僅かな誤差が生じる。同期ウィンドウのサイズがその誤差よりも小さくなったとき、そのノードは同期範囲から外れる。パケット損失率とマルチホップ RBS で達成可能な時刻同期の精度は相関関係にあり、どれほどパケット損失が発生しやすい環境に配置されるかで、マルチホップ RBS がどの程度の同期を実現できるかが決まる。



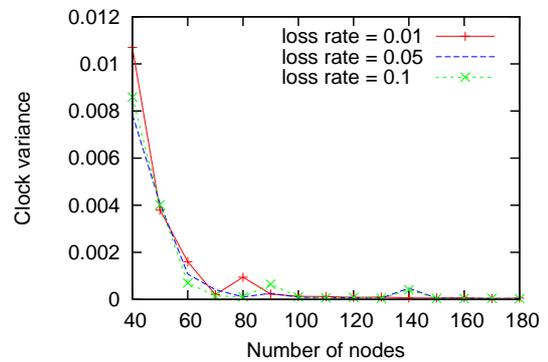
(a) 時刻同期するノードの割合



(b) ネットワーク全体が時刻同期する確率

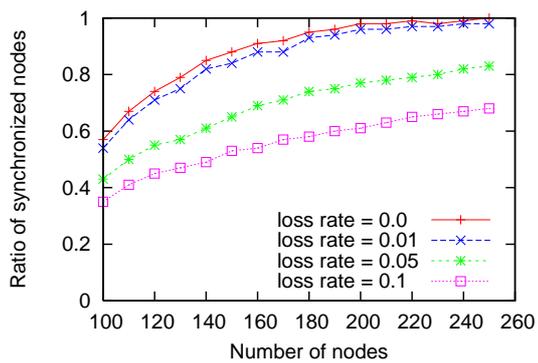


(c) 時刻同期するまでの時間

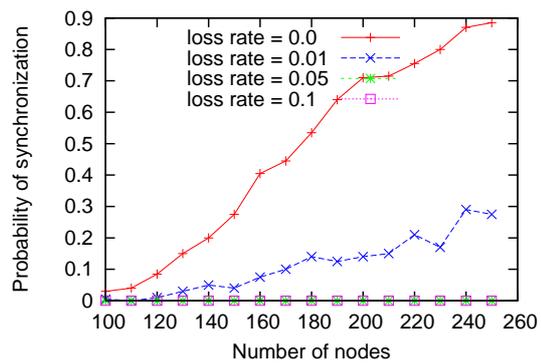


(d) 時刻同期の精度

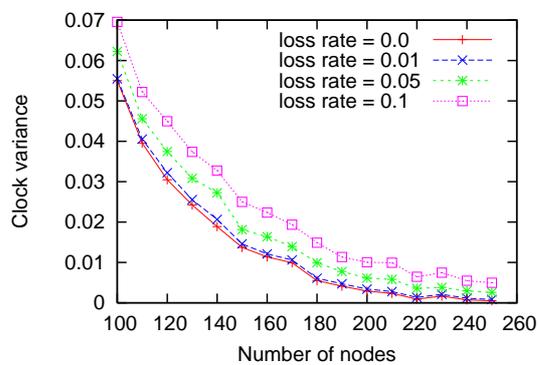
図 21: パケット損失率による影響 (PCO)



(a) 時刻同期するノードの割合

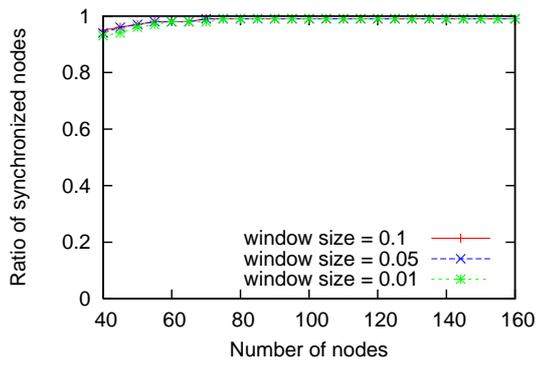


(b) ネットワーク全体が時刻同期する確率

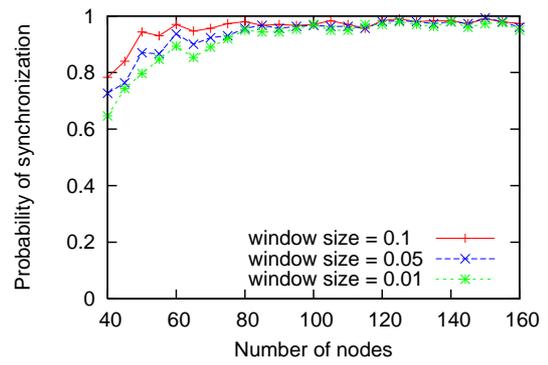


(c) 時刻同期の精度

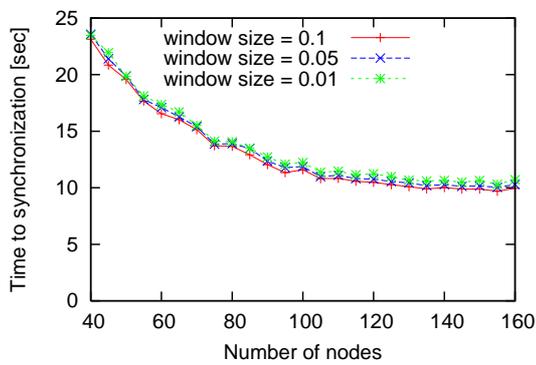
図 22: パケット損失率による影響 (マルチホップ RBS)



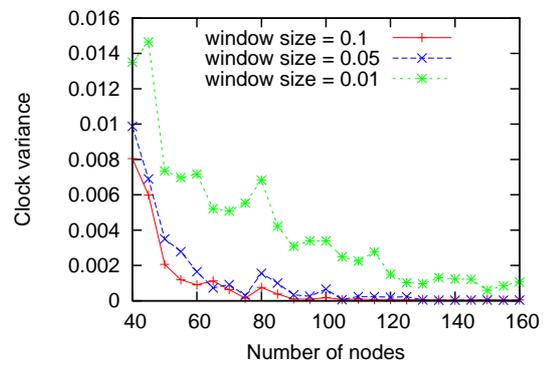
(a) 時刻同期するノードの割合



(b) ネットワーク全体が時刻同期する確率

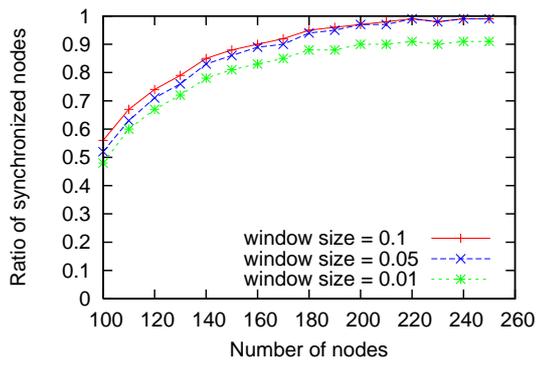


(c) 時刻同期するまでの時間

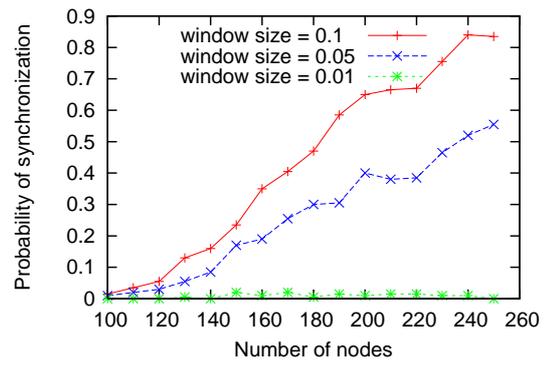


(d) 時刻同期の精度

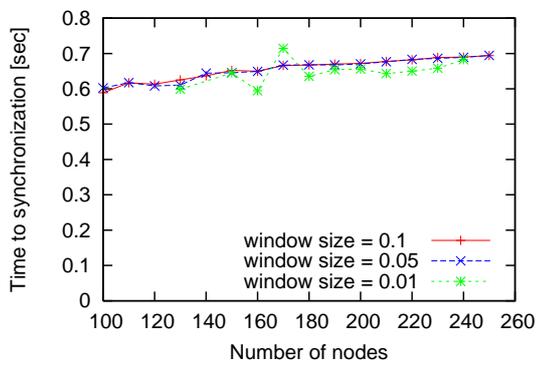
図 23: 同期ウィンドウのサイズによる影響 (PCO)



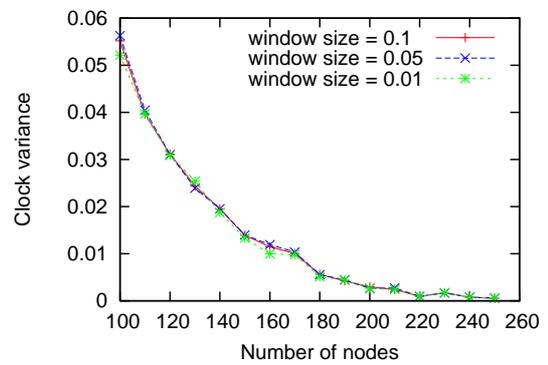
(a) 時刻同期するノードの割合



(b) ネットワーク全体が時刻同期する確率



(c) 時刻同期するまでの時間



(d) 時刻同期の精度

図 24: 同期ウィンドウのサイズによる影響 (マルチホップ RBS)

4.4.5 適用可能な観測領域の比較

図 25 は、ノード数が与えられたときに、そのノード数で確実に同期できる観測領域の半径を表したものである。半径 100m の観測領域をカバーするために必要なノード数は、PCO が 40 個でマルチホップ RBS は 200 個である。また、グラフの傾きはノード 1 個あたりがカバーする観測領域の広さを表しているが、マルチホップ RBS ではノード数の増加とともに傾きは減少している。これはマルチホップ RBS が観測できる領域の広さには限界があることを示している。これらのことから、PCO はマルチホップ RBS よりも広範囲にわたる観測領域で有効であることが示された。

4.5 PCO における CSMA/CA バックオフアルゴリズムの改良

本報告で用いる CSMA/CA は、PCO とマルチホップ RBS とともに IEEE802.15.4 を参考にしたものである。この CSMA/CA はパケットの衝突を避けて確実にパケットを送信先に送り届けることを前提としており、通信が集中したときや、通信のタイミングが一様でない通信環境において有効である。しかし、PCO では通信が集中するのは同期状態であると予測される。また、同期状態においては同時にパケット送信を試みるノードが近隣にも多数存在するため、あるノードがパケットの送信を諦めたとしても、他のパケット送信ノードがその影響を補うことができる。さらに、4.4.3 項のパケット損失率が PCO に与える影響からもわかるように、確実なパケット送信が行われなくても、時刻同期の精度や時刻同期にかかる時間はそれほど影響を受けない。バックオフ時間を短縮することで、時刻同期の精度を損なうことなく、より早く同期できるようになる。図 26 は、同期周期を 16 ミリ秒、バックオフ時間を 0 から 20 シンボル (320 マイクロ秒) までの間でランダムに選んだときの PCO と、IEEE802.15.4 に準拠した CSMA/CA を用いたマルチホップ RBS を、格子状での配置において時刻同期にかかる時間を比較した結果である。マルチホップ RBS の時刻同期にかかる時間はクラスタ数に比例するので、ネットワークの規模に比例して増えている。しかし、PCO は自律分散的に同期するのでマルチホップ RBS ほどネットワークの規模の影響を受けない。そのため、ネットワークの規模が大きくなると、PCO はマルチホップ RBS よりも早く時刻同期できる。また、図 17(c) での PCO と比較すると、時刻同期にかかる時間はおよそ 1/10 に短縮されている。このように、MAC 層での制御を変えることで PCO は時刻同期の精度を損なうことなく、短時間で時刻同期できるようになるが、仕様を変更する妥当性や時刻同期にかかる時間以外に及ぼす影響も考慮するために、さらなる検討が必要である。

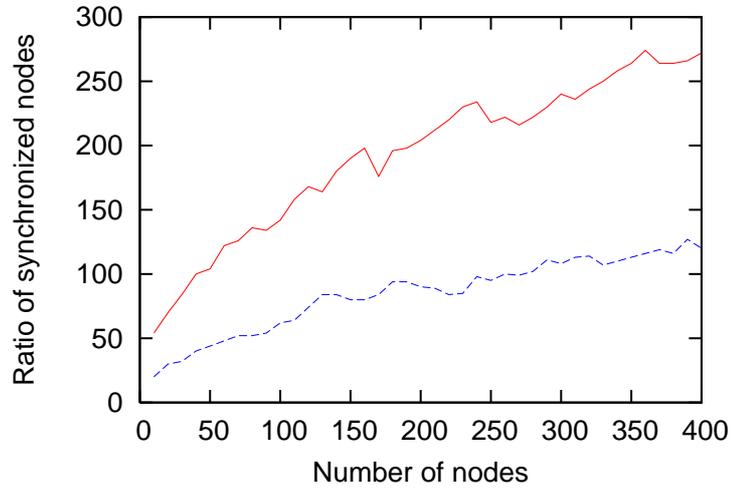


図 25: 確実な同期を期待することができる観測領域の比較

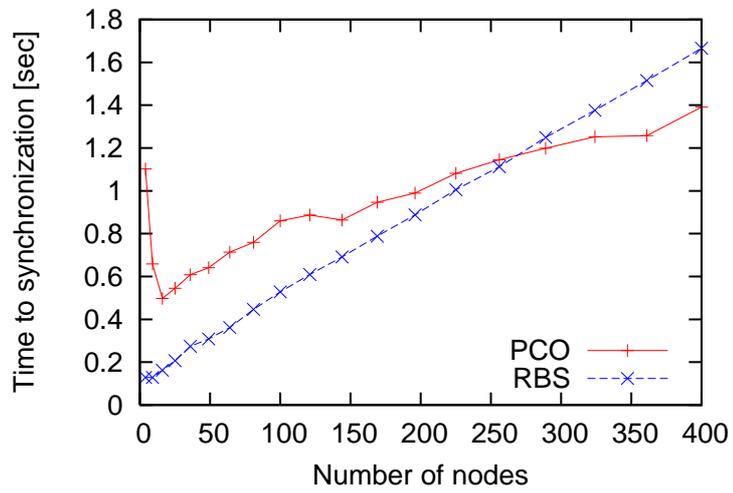


図 26: CSMA/CA に変更を加えた PCO とマルチホップ RBS の、時刻同期にかかる時間の比較

5 おわりに

本報告では、センサネットワークにおける時刻同期手法としてPCOとマルチホップRBSを対象としてさまざまなネットワーク環境に応じて比較評価を行った。まず格子状のノード配置において比較を行い、PCOとマルチホップRBSのもつ一般的な性質を明らかにした。続いてランダムなノード配置において比較を行い、ネットワーク環境の違いが時刻同期手法に与える影響や、それぞれの手法に適したネットワークの条件を明らかにした。PCOはパケット損失の影響を受けにくく、広範囲の観測領域にわたって安定した高精度の時刻同期を達成でき、ネットワークの規模に対する適応性も持っている。しかし、同期状態での集中通信によりアクセス遅延が増大することで同期するまでに長い時間を必要とし、状態変位幅 ϵ をネットワーク環境に応じて適切に設定しなければ同期できない。一方でマルチホップRBSは、高密度の安定した通信環境において、短時間で高精度の時刻同期を実現できるが、そのためにはノード間に十分な接続性が必要となり、パケット損失が起こりやすい環境では所望する時刻同期精度は得られず、適用できるネットワークは限られている。

今後の課題としては、ネットワーク環境に対応したPCOの状態変位幅の設定が挙げられる。各ノードが周囲の環境に応じて自発的に適切な状態変位幅を決定できれば、常に安定して同期するようなPCOを実現できる。また、送信電力制御によって最大通信距離を変化させることで、ノード間の接続性を制御する方法も考えられる。自律分散型機構のさらなる有意性を求めることを目標として、今後の研究に取り組んでいきたい。

謝辞

本報告にあたり，ご指導，ご教授して頂いた村田正幸教授に心より感謝申し上げます．また，本報告において終始指導して頂いた大阪府立大学の菅野正嗣助教授に深く感謝します．並びに，日頃より適切な助言を頂いた若宮直紀助教授，荒川伸一助手，Kenji Leibnitz 特任助教授に心からお礼を申し上げます．最後に，木利友一氏をはじめとする，いついかなるときも親身になって力になって下さった村田研究室の皆様のご厚意に心より感謝申し上げます．

参考文献

- [1] J. Elson, L. Girod, and D. Estrin, “Fine-grained network time synchronization using reference broadcasts,” in *Proceedings of Operational Systems and Design Implementation (OSDI)*, vol. 36, pp. 147–163, Dec. 2002.
- [2] I. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, “Wireless sensor networks: A survey,” *Computer Networks*, vol. 38, pp. 393–422, Mar. 2002.
- [3] F. Sivrikaya and B. Yener, “Time synchronization in sensor networks: A survey,” *IEEE Network Magazine’s special issue on Ad Hoc Networking: Data Communications and Topology Control*, vol. 18, no. 4, pp. 45–50, July 2004.
- [4] N. Wakamiya and M. Murata, “Synchronization-based data gathering scheme for sensor networks,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E88-B, pp. 873–881, Mar. 2005.
- [5] D. L. Mills, “Internet time synchronization: The network time protocol,” *IEEE Transaction on Communications*, vol. 29, pp. 1482–1493, Oct. 1991.
- [6] J. Elson and K. Römer, “Wireless sensor networks: A new regime for time synchronization,” in *Proceedings of the First Workshop on Hot Topics in Networks (HotNets-I)*, pp. 28–29, Jan. 2002.
- [7] R. E. Mirollo and S. H. Strogatz, “Synchronization of pulse-coupled biological oscillators,” *Journal on Applied Mathematics*, vol. 50, no. 6, pp. 1645–1662, Dec. 1990.
- [8] J. Elson, R. Karp, C. Papadimitriou, and S. Shenker, “Global synchronization in sensornets,” in *Proceedings of the 6th Latin American Symposium on Theoretical Informatics (LATIN’04)*, pp. 609–624, Apr. 2004.
- [9] Y. W. Hong and A. Scaglione, “A scalable synchronization protocol for large scale sensor networks and its applications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 5, pp. 1085–1099, May 2005.
- [10] S. F. Bush, “Low-energy sensor network time synchronization as an emergent property,” in *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Computer Communications and Networks*, pp. 93–98, Oct. 2005.

- [11] *IEEE Standards 802 Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANS)*. IEEE Inc., Aug. 2003.
- [12] G. Werner-Allen, G. Tewari, A. Patel, M. Welsh, and R. Nagpal, “Firefly-inspired sensor network synchronicity with realistic radio effects,” in *Proceedings of the 3rd ACM International Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys '05)*, pp. 142–153, Nov. 2005.
- [13] Y. Taniguchi, N. Wakamiya, and M. Murata, “A distributed and self-organizing data gathering scheme in wireless sensor networks,” in *Proceedings of the 6th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies*, pp. 299–304, Nov. 2005.
- [14] A. Ephremides, “A design concept for reliable mobile radio networks with frequency-hopping signaling,” in *Proceedings the IEEE*, vol. 75, pp. 56–73, Jan. 1987.